

XÁC ĐỊNH HIỆU SUẤT TỔNG VÀ HIỆU SUẤT NỘI CỦA DETECTOR NaI(Tl) KÍCH THƯỚC 3’’×3’’ ĐỐI VỚI NGUỒN DẠNG ĐĨA

HOÀNG ĐỨC TÂM^{*}, TRỊNH VĂN DANH^{**},
TRẦN THIỆN THANH^{***}, CHÂU VĂN TẠO^{****}

TÓM TẮT

Trong công trình này, phương pháp hybrid Monte Carlo được sử dụng để tính toán hiệu suất tổng và hiệu suất nội của detector NaI(Tl) đối với nguồn dạng đĩa, mỏng có tâm nằm trên trục đối xứng của detector NaI(Tl). Kết quả tính toán được so sánh với kết quả của các nghiên cứu khác và cho thấy sự phù hợp tốt.

Từ khóa: hiệu suất tổng, hiệu suất nội, nguồn đĩa, hybrid Monte Carlo, NaI (Tl).

ABSTRACT

Determination of total and intrinsic efficiencies of a 3’’ × 3’’ NaI(Tl) detector for a thin disc source

In this work, the hybrid Monte Carlo method was used to determine the total efficiency and intrinsic efficiency of NaI(Tl) detector for thin disc source with coaxial source-detector arrangement. Calculated results were compared with other related publications and proved a good appropriateness.

Keywords: total efficiency, intrinsic efficiency, disc source, hybrid Monte Carlo method, NaI(Tl).

1. Giới thiệu

Detector nhấp nháy sử dụng tinh thể NaI(Tl) được phát minh bởi R. Hofstadter vào năm 1948 với ưu điểm là có độ phân giải và hiệu suất dò cao, có thể hoạt động ở nhiệt độ phòng [10] nên được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau. Trong lĩnh vực ứng dụng công nghiệp, loại detector này được sử dụng để xác định vị trí khuyết tật đường ống [12], dò tắc nghẽn đường ống, v.v...

Để xác định được hoạt độ của nguồn phóng xạ gamma ứng với năng lượng tia gamma phát ra, một trong những thông số quan trọng cần phải biết là hiệu suất dò của detector. Do vậy, có thể thấy rằng việc xác định hiệu suất tổng và hiệu suất nội của detector NaI(Tl) vẫn hết sức cần thiết.

^{*} ThS, Trường Đại học Sư phạm TPHCM

^{**} HVCH, Trường Đại học Sư phạm TPHCM

^{***} TS, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG TPHCM

^{****} PGS TS, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG TPHCM

Hiệu suất tổng của detector NaI(Tl) với kích thước 3’’×3’’ đối với nguồn đĩa đã được T.Nakamura xác định bằng phương pháp giải tích [7]. Sau đó, cũng với phương pháp này Selim và các cộng sự đã trình bày kết quả tính toán hiệu suất tổng của detector nhấp nháy đặt đồng trục với detector. [11]

Bên cạnh phương pháp giải tích, một số tác giả khác cũng tính toán hiệu suất tổng của detector NaI(Tl) bằng phương pháp Monte Carlo do tính đơn giản của nó. [4, 8]

Năm 2007, S.Yalcin và các cộng sự [13] đã sử dụng kết hợp phương pháp Monte Carlo và phương pháp giải tích để xác định hiệu suất tổng của detector. Trong phương pháp này, nhóm tác giả trên đã sử dụng kỹ thuật Monte Carlo để xác định hướng của các photon phát ra từ nguồn. Dựa trên hướng photon này, phần quãng đường mà photon đi trong tinh thể được xác định bằng phương pháp giải tích. Sự kết hợp của hai phương pháp này được gọi là phương pháp hybrid Monte Carlo.

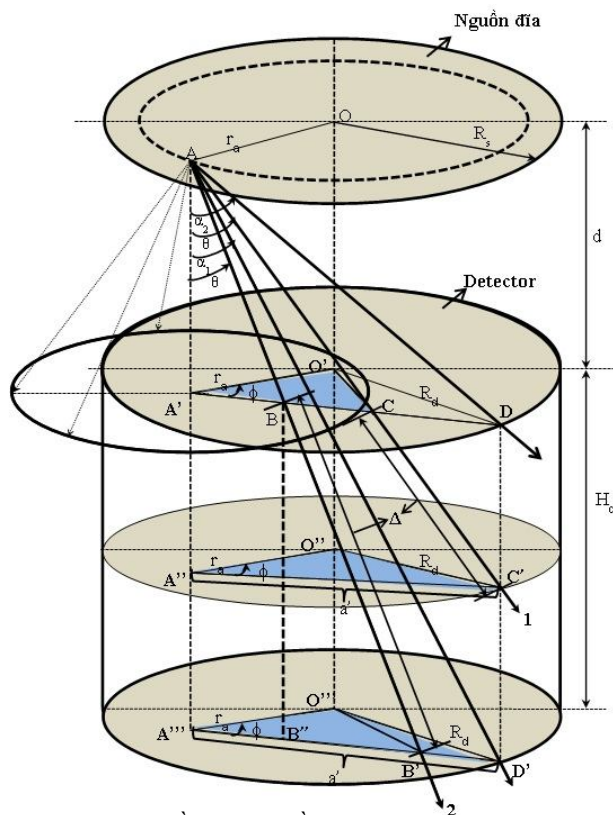
Trong nghiên cứu này, chương trình máy tính được viết bằng ngôn ngữ lập trình Fortran (CalcTotEff) chạy trên nền tảng Plato (Silverfrost) sử dụng phương pháp hybrid Monte Carlo của S.Yalcin để tính toán hiệu suất tổng và hiệu suất nội của detector NaI(Tl) đối với nguồn dạng đĩa theo các khoảng cách khác nhau. Dựa trên hiệu suất tổng tính được, hiệu suất nội của detector NaI(Tl) cũng sẽ được tính.

2. Phương pháp hybrid Monte Carlo

2.1. Xác định hiệu suất tổng của detector NaI(Tl)

Phương pháp hybrid Monte Carlo được đưa ra bởi S. Yalcin [13] có ưu điểm là thời gian tính toán nhanh và linh hoạt khi dễ dàng thay đổi các thông số như: khoảng cách detector – nguồn (d), hệ số suy giảm tuyến tính toàn phần (μ), v.v... Để làm cơ sở cho việc viết chương trình bằng Fortran trong tính hiệu suất tổng và hiệu suất nội, chúng tôi trình bày lại tóm tắt nội dung thuật toán mà S.Yalcin đã đưa ra.

Trong hệ thống nguồn đĩa – detector, tâm của nguồn đĩa nằm trên trục đối xứng của detector. Nguồn đĩa được sử dụng trong tính toán là nguồn dạng đĩa tròn mỏng có



Hình 1. Nguồn đĩa đặt đồng trục với detector NaI(Tl)

bán kính R_s nhỏ hơn hoặc bằng bán kính của detector R_d ($R_s \leq R_d$). Có thể xem photon phát ra từ các điểm phân bố đồng nhất trên nguồn đĩa, các điểm này nằm trên một đường tròn có tâm trùng với tâm nguồn đĩa bán kính r_a được xác định bởi:

$$r_a = R_s \sqrt{q} \quad (0 \leq r_a \leq R_s) \text{ với } q = \cos\theta \quad (1)$$

Quá trình chọn một điểm bất kì trên nguồn đĩa là quá trình hoàn toàn ngẫu nhiên do vậy có thể dùng hàm RANDOM_NUMBER(1) trong Fortran và thuật toán phù hợp để tạo ra giá trị chọn lọc ngẫu nhiên.

Xét điểm A thuộc đường tròn (O, r_a) được xem là nguồn điểm phát photon từ nguồn dạng đĩa, đường đi của photon phát ra từ nguồn điểm A đến detector được xác định qua góc cực θ ($0 \leq \theta \leq \pi/2$) và góc phương vị φ : $\varphi = 2\pi q$ ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$). Photon phát ra từ nguồn điểm A với góc θ nằm trong phạm vi của hình nón có góc ở đỉnh là 2θ và chiều cao là d. Bán kính của mặt đáy hình nón là: $\overline{A'C} = d \tan \theta$.

$$\text{Góc } \alpha_2 \text{ được tính: } \tan \alpha_2 = \frac{\overline{A'D}}{\overline{AA'}} = \frac{a'}{d} \Rightarrow \alpha_2 = \tan^{-1}\left(\frac{a'}{d}\right) \quad (2)$$

với a' được xác định như sau:

$$R_d^2 = r_a^2 + a'^2 - 2r_a a' \cos\phi \Rightarrow a'^2 - 2(r_a \cos\phi)a' + (r_a^2 - R_d^2) = 0 \quad (3)$$

$$\text{Nghiệm của phương trình (3) với ẩn là } a': a' = r_a \cos\phi \pm \sqrt{r_a^2 \cos^2\phi - (r_a^2 - R_d^2)} \quad (4)$$

$$\text{Xét nghiệm dương của } a': a' = r_a \cos\phi + \sqrt{r_a^2 \cos^2\phi - (r_a^2 - R_d^2)} \quad (5)$$

Đường đi của photon trong detector được xác định bởi các góc θ , α_1 , α_2 .

- Nếu $\cos\theta \leq \cos\alpha_2 \Rightarrow \theta \geq \alpha_2$: photon không đi vào bên trong detector.
- Nếu $\cos\theta \geq \cos\alpha_2 \Rightarrow \theta \leq \alpha_2$: photon sẽ đi vào bên trong detector và tương tác với tinh thể NaI (TI). Khi đó sẽ có 2 khả năng xảy ra:

○ Khả năng thứ nhất: photon thoát ra từ mặt bên của detector (mô tả bởi đường số 1 như trong hình 1).

○ Khả năng thứ hai: photon thoát ra từ mặt đáy của detector (mô tả bởi đường số 2 như trong hình 1).

Để xác định xem photon đi ra từ mặt bên hay mặt đáy của detector cần dựa vào giá trị của góc α_1 . Góc α_1 được tính:

$$\begin{aligned} \tan \alpha_1 &= \frac{\overline{A''D'}}{\overline{AA''}} = \frac{a'}{H_d + d} \\ \Rightarrow \alpha_1 &= \tan^{-1}\left(\frac{a'}{H_d + d}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

▪ Nếu $\theta \leq \alpha_1$ thì photon sẽ tương tác với tinh thể NaI bên trong detector và đi ra từ đáy của detector. Khi đó quãng đường của photon đi trong detector được xác định bởi $\Delta = \overline{BB'} = \frac{\overline{BB''}}{\cos\theta} = \frac{H_d}{\cos\theta}$.

▪ Nếu $\alpha_1 < \theta < \alpha_2$ thì photon sẽ tương tác với tinh thể NaI bên trong detector và đi ra từ mặt bên của detector. Quãng đường của photon đi trong detector trong trường hợp này được tính như sau: $\Delta = \overline{CC'} = \overline{AC'} - \overline{AC}$

$$\left. \begin{aligned} \overline{AC'} &= \frac{\overline{A''C'}}{\sin\theta} = \frac{a'}{\sin\theta} \\ \overline{AC} &= \frac{\overline{AA'}}{\cos\theta} = \frac{d}{\cos\theta} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta = \frac{a'}{\sin\theta} - \frac{d}{\cos\theta}$$

Như vậy, quãng đường photon đi trong detector được xác định như sau:

$$\Delta = \begin{cases} \frac{H_d}{\cos\theta} & \text{khi } \theta \leq \alpha_1 \\ \frac{a'}{\sin\theta} - \frac{d}{\cos\theta} & \text{khi } \alpha_1 < \theta < \alpha_2 \end{cases} \quad (7)$$

Một photon với năng lượng E đi được quãng đường Δ bên trong detector, phần hấp thụ đối với photon đó được xác định bởi:

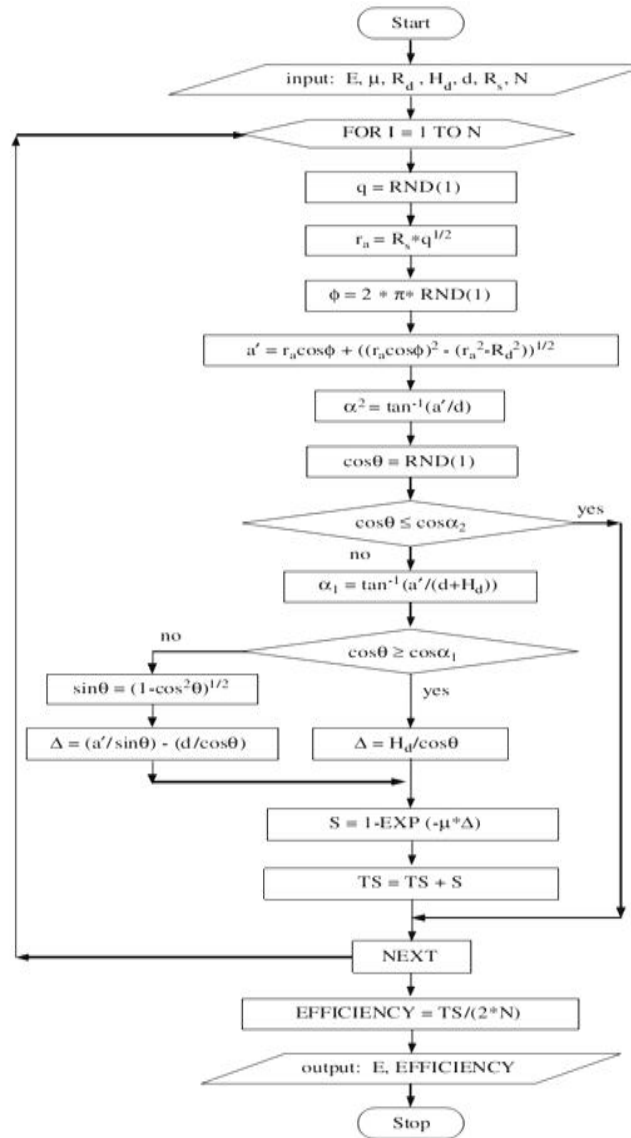
$$S(E) = 1 - e^{-\mu(E)\Delta} \quad (8)$$

trong đó μ(E) là hệ số suy giảm tuyến tính toàn phần và được xác định nhờ chương trình XCOM [2].

Hiệu suất tổng của detector NaI (TI) được xác định bởi công thức [4]:

$$\varepsilon_t(E) = \frac{\sum S(E)}{2N} \quad (9)$$

Sơ đồ thuật toán xác định hiệu suất tổng đối với nguồn đĩa bằng phương pháp hybrid Monte Carlo được trình bày trong hình 2.



Hình 2. Lưu đồ thuật toán tính hiệu suất tổng của detector NaI (Tl) đối với nguồn đĩa

2.2. Xác định hiệu suất nội của detector NaI (Tl)

Bên cạnh hiệu suất tổng, hiệu suất nội cũng là một tham số quan trọng đánh giá khả năng đo đạc của detector. Hiệu suất nội được xác định là tỉ số giữa số đếm trong đỉnh năng lượng toàn phần với số photon đến đập vào tinh thể. Hiệu suất nội có thể được tính qua hiệu suất tổng theo công thức:

$$\varepsilon_i = \frac{2\varepsilon_t}{1 - \frac{d/R}{\sqrt{(d/R)^2 + 1}}} \tag{10}$$

Hiệu suất nội phụ thuộc vào nhiều yếu tố như năng lượng photon tới, sự phát photon, sự hấp thụ và cả việc năng lượng bỏ lại trong đỉnh năng lượng toàn phần.

Trong nghiên cứu này, thông qua việc tính hiệu suất tổng đối với nguồn dạng đĩa hiệu suất nội của detector NaI(Tl) cũng được tính.

3. Kết quả

3.1. Đánh giá độ tin cậy của chương trình tính hiệu suất tổng CalcTotEff

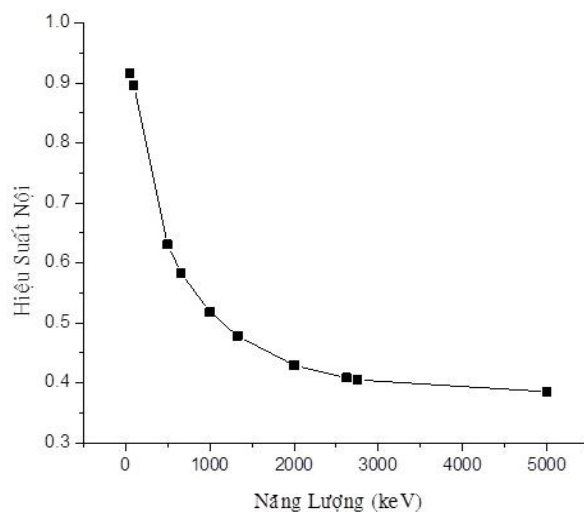
Để đánh giá chương trình tính hiệu suất CalcTotEff, việc so sánh hiệu suất tổng được tính từ CalcTotEff với các tác giả khác sẽ được thực hiện. Kết quả về hiệu suất tổng trình bày trong bảng 1 và 2 được tính toán với số photon phát ra từ nguồn đĩa là 2.10^8 hạt.

Bảng 1. Hiệu suất tổng của detector NaI(Tl) kích thước 3''x3'' đối với nguồn đĩa có bán kính $R_s=3,81\text{cm}$ đặt đồng trục với detector cách bề mặt detector khoảng $d = 3,0\text{cm}$

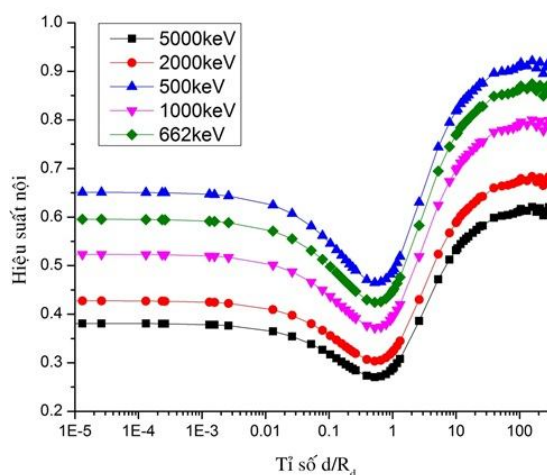
Năng lượng (keV)	Hiệu suất tổng			
	Kết quả của chúng tôi	S. Yalcin [13]	Cesana and Terrari [3]	Heath [5]
81	0,1446	0,1451	0,1430	0,1450
212	0,1226	0,1224	0,1230	0,1230
1100	0,0701	0,0701	0,0701	0,0702

Bảng 2. Hiệu suất tổng của detector NaI(Tl) kích thước 3''x3'' đối với nguồn đĩa có bán kính $R_s=3,81\text{cm}$ đặt đồng trục với detector cách bề mặt detector khoảng $d = 10,0\text{cm}$

Năng lượng(keV)	Hiệu suất tổng					
	Kết quả của chúng tôi	S.Yalcin [13]	Belluscio và cộng sự. [1]	Nakamura [8]	Vegors và cộng sự [14]	Selim và cộng sự [11]
50	0,0300	0,0301	--	--	--	0,02744
100	0,0294	0,0295	--	--	--	0,02801
500	0,0206	0,0206	--	--	--	0,02087
661	0,0191	0,0191	0,0190	0,0183	--	--
1000	0,0170	0,0169	--	--	--	0,01727
1332	0,0156	0,0155	0,0164	0,0168	0,0156	--
2000	0,0141	0,0142	--	--	--	0,01440
2620	0,0133	0,0133	--	0,0132	0,0133	--
2750	0,0132	0,0133	0,0141	--	--	--
5000	0,0126	0,0127	--	--	--	0,01298



Hình 3. Sự phụ thuộc của hiệu suất nội theo năng lượng



Hình 4. Sự phụ thuộc của hiệu suất nội theo tỉ số d/R_d

Kết quả trình bày trong bảng 1 và bảng 2 cho thấy sự phù hợp về kết quả giá trị hiệu suất tổng được tính toán từ chương trình CalcTotEff với các tác giả khác đã khẳng định được độ tin cậy của chương trình CalcTotEff mà chúng tôi phát triển trên nền tảng ngôn ngữ lập trình Fortran.

3.2. Hiệu suất nội của detector NaI(Tl)

Hình 3 chỉ ra sự phụ thuộc của hiệu suất nội của detector NaI(Tl) kích thước 3''x3'' theo năng lượng photon phát ra từ nguồn đĩa có bán kính $R_s=3,81$ cm đặt đồng trục với detector cách bề mặt detector khoảng d bằng 10cm. Từ đồ thị cho thấy, hiệu suất nội của detector NaI(Tl) thay đổi theo năng lượng, khi năng lượng càng tăng thì hiệu suất nội càng giảm.

Hình 4 chỉ ra sự phụ thuộc của hiệu suất nội vào tỉ số d/R_d của detector NaI(Tl) kích thước $3'' \times 3''$ đối với photon có năng lượng 1332 keV. Từ đồ thị cho thấy, hiệu suất nội của detector NaI(Tl) đối với nguồn dạng đĩa thay đổi theo tỉ số d/R_d , đầu tiên khi tăng tỉ số d/R_d thì hiệu suất nội sẽ giảm và sau khi đạt giá trị nhỏ nhất tại tỉ số $d/R_d=0,5$ nó lại tiếp tục tăng lên và bão hòa khi tỉ số d/R_d trên giá trị 100. Dạng thay đổi của đồ thị biểu diễn hiệu suất nội theo tỉ số d/R_d phù hợp với nghiên cứu trước đây. [6]

4. Kết luận

Trong nghiên cứu trên, chúng tôi đã sử dụng phương pháp hybrid Monte Carlo của S. Yalcin và các cộng sự để tính toán hiệu suất tổng và hiệu suất nội của detector NaI(Tl) kích thước $3'' \times 3''$, đồng thời viết chương trình bằng ngôn ngữ lập trình Fortran (CalcTotEff) để tính toán hiệu suất tổng, kết quả thu được cho thấy có sự phù hợp với kết quả của các nhóm tác giả khác. Điều này, một lần nữa đã khẳng định lại độ tin cậy của phương pháp hybrid Monte Carlo và làm cơ sở cho việc sử dụng phương pháp này vào việc tính toán do ưu điểm tính toán nhanh và linh hoạt của nó.

Bên cạnh đó, chúng tôi cũng sử dụng phương pháp hybrid Monte Carlo để tính toán hiệu suất nội của detector NaI kích thước $3'' \times 3''$ đối với nguồn dạng đĩa, đồng thời khảo sát sự phụ thuộc của hiệu suất nội vào tỉ số d/R_d và đối với các giá trị năng lượng khác nhau. Kết quả cho thấy hiệu suất nội đạt giá trị cực tiểu khi tỉ số d/R_d có giá trị trong phạm vi từ 0,5 đến 1 và bão hòa tại các tỉ số d/R_d nhỏ hơn 0,01 hoặc lớn hơn 10. Từ đây có thể kết luận rằng, để ghi nhận được photon với hiệu suất cao khi sử dụng detector NaI(Tl) kích thước $3'' \times 3''$, nguồn đĩa cần đặt rất gần ($d/R_d < 0,01$) hoặc xa detector ($d/R_d > 10$). Tuy nhiên trong thực nghiệm, việc đo đạc sẽ thực hiện dễ dàng hơn với tỉ số $d/R_d > 10$.

Trong nghiên cứu này, trong khi tính hiệu suất tổng và hiệu suất nội, chúng tôi đã bỏ qua sự hấp thụ của các lớp vật chất bao bọc quanh tinh thể NaI(Tl) như: silicon, nhôm, ô-xít nhôm (Al_2O_3). Tuy nhiên kết quả nghiên cứu trong công trình tính toán hiệu suất tổng và hiệu suất nội đối với nguồn điểm mà chúng tôi thực hiện đã chỉ ra rằng sự khác biệt giữa hiệu suất tổng giữa lý thuyết và thực nghiệm là dưới 10%.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Belluscio M., DeLeo R., Pantaleo A., Vox A. (1974), "Efficiencies and response functions of NaI(Tl) crystals for gamma-rays from thick disk sources", *Nucl. Instrum. Methods* 118 (2), pp.553–563.
2. Berger M.J., Hubbell J.H., Seltzer S.M., Chang I., Coursey J.S., Sukumar R., Zucker D.S., and Olsen K. (1999), XCOM version 3.1, NIST Standard References Database 8 (XGAM).
3. Cesana A., Terrani M. (1977), "Gamma-ray activity determination in large volume samples with Ge–Li detector", *Anal. Chem*, 49 (8), pp.1156–1159.

4. Haase G., Tait D. and Wiechen A. (1993), “Monte Carlo simulation of several gamma – emitting source and detector arrangements for determining corrections of self-attenuation and coincidence summation in gamma spectrometry”, *Nucl. Inst. Meth, A* 329, pp.483 – 492.
5. Heath, R.L. (1964), *Scintillat. Spectrom*, 1, IDO-16880-1.
6. Jehouani A., Ichaoui R., Boulkheir M. (2000), “Study of the NaI(Tl) efficiency by Monte Carlo method”, *Appl. Radiat. Isot.*, 53, pp.887 – 891.
7. Nakamura T. (1970), “Calculation of the detection efficiency of a 3” dia. 3” NaI(Tl) crystal for thick disk source, *Nucl.Inst. Meth*, 86, pp.163 – 168.
8. Nakamura T. (1972), “Monte Carlo calculation of efficiencies and response functions of NaI(Tl) crystal thick disk gamma – ray sources and its application to Ge(Li) detectors”, *Nucl. Inst. Meth.*, 105, pp.77 – 89.
9. Ogundare F.O., Oniya E.O., and Balogun F.A. (2008), “Dependence of NaI(Tl) detector intrinsic efficiency on source – detector distance, energy and off-axis distance: Their implications for radioactivity measurements, *Pramana –J.Phys.*, 70, pp.863 – 874.
10. Perez-Andujar A., Pibida L. (2004), Performance of CdTe, HPGe and NaI(Tl) detectors for radioactivity measurements, *Appl. Radiat. Isot.*, 60, pp.41 – 47.
11. Selim Y. S., Abbas M. I., Fawzy M. A. (1998), “Analytical calculation of the efficiencies of gamma scintillators. Part I: Total efficiency for coaxial disk sources”, *Radiat. Phys. Chem.*, 53, pp.589 – 592.
12. Silva I. L. M., Lopes R.T., De Jesus E.F.O. (1999), “Tube defects inspection technique by using Compton gamma-rays backscattering”, *Nucl. Inst. Meth.*, A422, pp.957 – 963.
13. Yalcin S., Gurler O., Keynak G., Gundogdu O. (2007), “Calculation of total counting efficiency of a NaI(Tl) detector by hybrid Monte –Carlo method for point and disk sources”, *Appl. Radiat.Isot.*, 65, pp.1179 – 1186.
14. Vegors Jr. S.H., Marsden L.L., Heath R.L. (1958), USAEC Report IDO-16370.

(Ngày Tòa soạn nhận được bài: 30-8-2013; ngày phản biện đánh giá: 30-9-2013;
ngày chấp nhận đăng: 20-10-2013)